

· 航道及通航建筑物 ·



白石窑枢纽双线船闸上引航道错峰运行水力特性数值模拟分析*

袁浩^{1,2,3}, 曹祥雨², 胡瑞昌^{1,2}, 宋翔², 谢春航^{1,4}

(1. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;
3. 重庆市交通规划和技术发展中心, 重庆 400060; 4. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

摘要: 船闸灌水过程中会引起上引航道内的水位波动, 形成斜向水流、回流、分离漩涡等不良流态, 对船舶航行和停泊安全产生不利影响。依托白石窑枢纽工程, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 针对双线船闸上引航道内由错峰运行引起的非恒定流问题, 对不同条件下的水位、波速等水力特性进行分析。结果表明, 双线船闸错峰运行会引起相应的水位波动幅度减小, 在船闸灌水期内水位变化过程更为复杂; 在进水口附近一定范围内出现表面漩涡, 甚至出现串通漏斗漩涡, 影响进水口及闸室输水条件、阀门工作状态。通过评估对船舶航行和停泊产生的不利影响得出, 应避免双线船闸同时灌水, 加强引航道内水流条件和进水口进流流态原型观测, 根据原型观测结果, 调整双线船闸灌水阀门开启方式、开启时间, 并加强双线船闸联合调度, 保障船舶过闸安全。研究成果可为提高船闸通过能力提供科学依据。

关键词: 水力特性; 数值模拟; 上引航道; 错峰运行

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0070-09

Numerical simulation analysis of hydraulic characteristics during staggered operation of upper approach channel of double-line ship lock at Baishiyao hub

YUAN Hao^{1,2,3}, CAO Xiangyu², HU Ruichang^{1,2}, SONG Xiang², XIE Chunhang^{1,4}

(1. Chongqing Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing 400016, China;
2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Chongqing Transportation Planning and Technology Development Center, Chongqing 400060, China;
4. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China)

Abstract: The water level fluctuation in the upper approach channel will be caused during the filling process of the ship locks, and the formation of undesirable flow regimes such as oblique currents, backflows, and separation eddies will adversely affect the safety of ship navigation and berthing. Relying on Baishiyao hub project, this paper adopts RNG $k-\varepsilon$ turbulence model to analyze the water level, wave speed and other hydraulic characteristics under different conditions for the non-constant flow problem caused by staggered operation in the upper approach channel of double-line ship lock. The results show that the staggered operation of double-line ship lock will cause the corresponding water level fluctuation amplitude to be reduced, and the water level change process is more complicated during the filling period of the lock. Surface eddies appear in a certain range near the intake. Even cascading funnel whirlpools occur, affecting the water intake and lock chamber water delivery conditions, as well as the valve working condition. By assessing the adverse effects on the navigation and mooring of vessels, it is concluded that simultaneous

收稿日期: 2025-01-20

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206104); 重庆市交通科技项目(CQJT-ZCXM2023-11)

作者简介: 袁浩(1989—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为通航水力学。

通信作者: 谢春航(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为通航水力学。E-mail: xiechunhang@126.com

water filling in the double-line ship lock should be avoided. The flow conditions in the approach channel and the flow patterns at the intake should be strengthened in terms of prototype observation. Based on the results of the prototype observation, the opening mode and time of the water filling valves in the double-line ship lock should be adjusted, and the joint dispatching of the double-line ship lock should be strengthened to ensure the safety of vessels passing through the lock. The research results provide a scientific basis for improving the capacity of the ship lock.

Keywords: hydraulic characteristics; numerical simulation; upper approach channel; staggered operation

引航道的作用是引导船舶进出闸室^[1]。船闸灌泄水时上引航道内往往产生复杂的流态, 上下游引航道会产生非恒定流, 引起水面波动, 形成过大横向流速和斜向水流、回流、分离漩涡等不良流态, 导致引航道内系靠船舶受到复杂动水作用力, 影响船舶进出引航道航行安全。此外, 闸室内涌浪波动还会使引航道中水面降低, 减小有效水深, 加大船舶触底风险。因此, 在船闸设计中应研究改善引航道水流条件, 尽量避免复杂流态的产生, 以保障通航安全。

早期研究中, 国内许多学者^[2-6]发现, 在进行通航建筑物灌泄水时, 船闸上、下游引航道内产生非恒定流, 由此引起的水面波动和流速、流态变化不仅对引航道内系靠船舶产生各种动水作用力, 同时还可能直接影响船只进出引航道。周作茂等^[7]结合长沙综合枢纽, 采用三维数值模拟的研究方法分析不利水流条件下的波高、波速、水面比降以及系缆力等因素, 提出错峰运行、旁泄泄水和增大航道尺寸的措施来改善航道内的水流条件。齐庆辉等^[8]采用 MIKE21 水动力模型对韩庄双线船闸下游引航道水力特性进行了模拟, 研究引航道、靠船墩以及口门区的流速流态, 提出增加格栅和局部疏浚的工程措施。黄伦超等^[9]通过建立二维数学模型研究双线船闸共用下引航道同时泄水、错峰泄水和旁侧泄水的规律发现, 与同时泄水相比, 旁侧泄水和错峰泄水可以减小水流流速和水面波动。泄水量、流量增率和最大流量是决定初始波形的主要因素, 因此双线船闸单独、同时或错峰向引航道泄水时, 整个引航道内的水位波动及流速都较大, 通航水流条件相对恶

劣, 尤其是下闸首处。尽管船闸灌泄水时都会使引航道水流产生波动现象, 但不同开启方式和流量级时上下游水面产生的波有所不同。

目前, 关于上引航道水流条件的研究大多是针对引航道口门区进行, 关于双线或多线船闸共用引航道错峰运行的研究很少^[10]。本文研究以白石窑为例, 针对一、二线船闸在错峰灌水过程中形成的不利水流条件进行数值模拟研究, 分析由于引航道错峰运行产生的非恒定流特性对船舶通航条件的影响。特别着眼于优化双线船闸调度运行方式及闸门开启方式, 保障船舶过闸安全, 以期为提高船闸通过能力提供科学依据。

1 白石窑船闸概况

白石窑枢纽位于广东省英德市上游 25 km 处, 是以发电为主、兼顾航运等综合利用的水利水电工程, 电站总装机容量 92 MW, 属大 II 型工程。白石窑坝址上距濠里枢纽 39 km, 下距飞来峡枢纽 75.5 km, 坝址以上控制流域面积 1.77 万 km², 多年平均流量 532 m³/s, 枢纽正常蓄水位 37.32 m。轴线总长 1 092 m, 坝顶高程 44.32 m, 最大坝高 38.5 m, 新建一、二线 III 级船闸具有千吨级船舶通过能力。拟拆除重建的原一线船闸尺度为 140 m×23 m×4.5 m (闸室长度×闸室宽度×门槛水深), 新建二线船闸尺度为 220 m×23 m×4.5 m。重建一线船闸闸室尺度变更后与二线船闸建设规模一致, 两线船闸共用宽 98.4 m 的引航道, 船舶进出闸方式为“直线进闸、曲线出闸”。上下游主导航墙及靠船墩布置在引航道两侧。一、二线船闸上下游引航道直线段长均为 395 m, 其中导航调顺段长 170 m, 靠船

段长 225 m, 上游引航道底高程 27.52 m (上游设计最低通航水位 32.02 m、引航道水深 4.5 m), 下游引航道底高程 19.32 m (下游设计最低通航水位 23.82 m、引航道水深 4.5 m)。

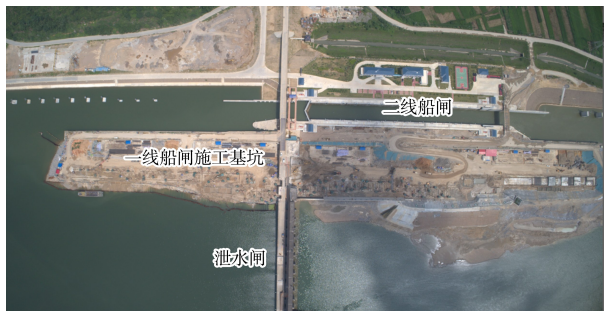


图 1 白石窑船闸总体布置

Fig. 1 General layout of Baishiyao ship lock

2 数值模拟

2.1 控制方程

本文研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 其控制方程如下。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (5)$$

式中: ρ 和 p 分别为体积分数加权平均密度和修正压力; μ 为体积分数加权平均的分子黏性系数;

μ_t 为紊流黏性系数, 它可由紊流动能 k 及紊流动能耗散 ε 求出; μ_{eff} 为有效黏性系数; G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项; u_i 、 u_j 分别为 x_i 、 x_j 方向的速度分量, $i, j=1, 2, 3$; C_{μ} 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数, 取值分别为 0.084 5、1.42、1.68; η 为紊流时间尺度与平均流动时间尺度之比; η_0 为 η 的典型值, 取值为 4.377; β 为系数, 取值为 0.012^[11]。

2.2 模型构建

根据白石窑船闸上引航道设计方案, 其导调段为 170 m, 靠船段为 225 m, 引航道总长 395 m。考虑到计算需要一定的进出口长度, 以保证模型进口水流进流平稳, 确保研究区域水流的相似性, 因此三维模型模拟范围纵向总长 645 m, 其中进口段向上游加长 200 m, 下游侧包含船闸整个进水口段和上闸首段; 横向总宽度为 180 m, 包含整个上引航道和两侧边坡和隔流墙。

白石窑船闸上引航道三维几何建模采用三维建模软件 CATIA, 研究模型见图 2。在模拟计算区域内, 计算网格形式均采用六面体结构化网格。对于重点研究区域, 船闸进水口段采用渐变网格的处理方法进行局部加密。计算区域网格块在 x 、 y 、 z 方向的网格尺寸范围分别为 1.0~2.3、0.5~1.1 和 0.5~1.5 m, 计算域网格总数量为 203 万个。

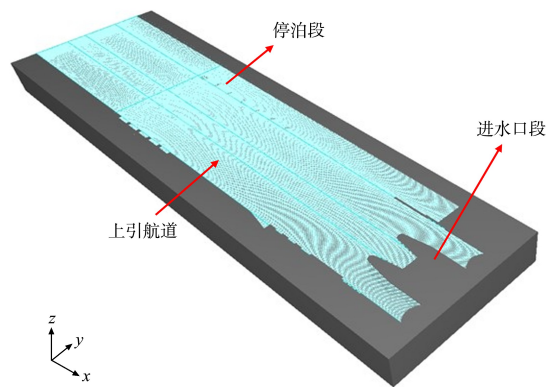


图 2 船闸上引航道三维模型网格划分

Fig. 2 Grid delineation of three-dimensional model of upper approach channel of ship lock

2.3 模型验证

为验证数值模拟的可行性, 以类似船闸物理模型泄水试验过程进行验证, 见图 3。



a) 闸道

b) 下引航道

图 3 船闸物理模型试验布置

Fig. 3 Physical model test layout of ship lock

计算得到船闸中心点水位对比, 见图 4。可以发现, 当船闸中心点水位与下引航道水位齐平时, 数值模拟泄水时间为 470 s。由于船闸物理模型与数值模型之间存在比尺效应, 导致数值和试验结果存在差异, 泄水时间误差约为 11.3%, 但总体模拟变化与试验结果基本吻合, 故可以采用该数值模型进行试验。

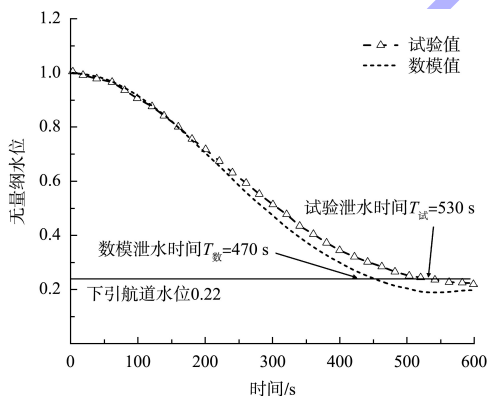


图 4 船闸中心点水位对比

Fig. 4 Comparison of water level at center point of the ship lock

2.4 数值模型工况

根据不同的水位组合、船闸运行方式和阀门开启方式, 拟定一线船闸灌水阀门开启 3、6 min 后, 二线船闸灌水阀门再开启 (灌水阀开启时间 $t_v = 6 \text{ min}$), 计算工况见表 1。

表 1 计算工况

Tab. 1 Working conditions of calculation

计算工况	t_v/min	错峰时间/min	运行时间/s
1	6	3	310
2	6	3	490
3	6	6	310
4	6	6	670

2.4 测点布置

为全面观测一、二线船闸灌水过程中上引航道的非恒定流特性, 在上引航道布置监测点, 1#~8#位置见图 5。

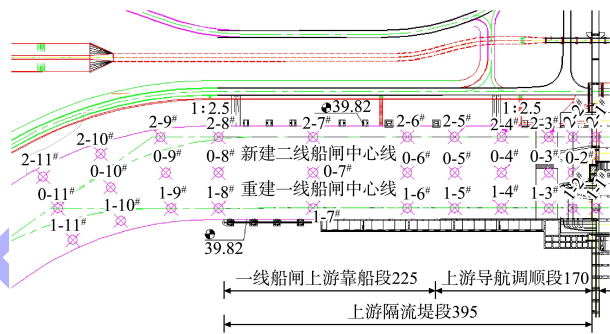


图 5 监测点布置 (单位: m)

Fig. 5 Layout of measurement points (unit: m)

2.5 计算边界条件

在计算区域网格块的上表面边界, 由于自由表面为水体与大气的交界面, 边界条件设定为压力边界条件, 给定水面压力 $P = 101.3 \text{ kPa}$ 。计算入口边界采用水位边界条件, 根据具体计算工况, 给定上游入口断面水面高程 H_{inlet} 及水面压力 $P = 101.3 \text{ kPa}$ 。

白石窑双线船闸进水口即为模型出口, 其灌水流量过程为非恒定过程。为精确控制模型出口流量过程, 在船闸进水口处添加质量汇项, 其几何尺寸与进水口尺寸保持一致。

壁面采用无滑移壁面条件, 给定相应的河道及岸坡壁面糙率为 0.035~0.045; 将结构物视为混凝土材质, 给定相应的壁面糙率为 0.017。为了提高计算效率, 计算前对计算区域内的流体进行初始化, 给定相应的库区水位, 使流体充满整个计算区域。

3 结果分析

3.1 错峰灌水流量过程

上游边界水位维持在 37.32 m，一线船闸先运行 3 或 6 min，随后二线船闸开始运行，双线船闸灌水阀门开启时间均为 6 min，灌水方式均为双边廊道灌水。灌水流量过程线见图 6。

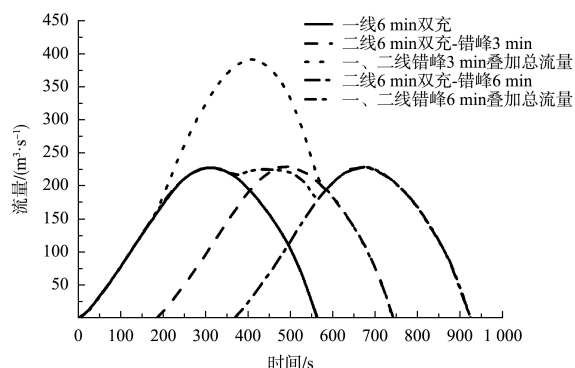


图 6 错峰灌水流量过程线

Fig. 6 Staggered irrigation flow process line

3.2 上引航道流场计算成果分析

为分析双线船闸共用上引航道内及进水口局部位置流速分布及流态情况，本文着重分析在船闸灌水过程中，工况 2、3 最大流速时刻的流场，见图 7。

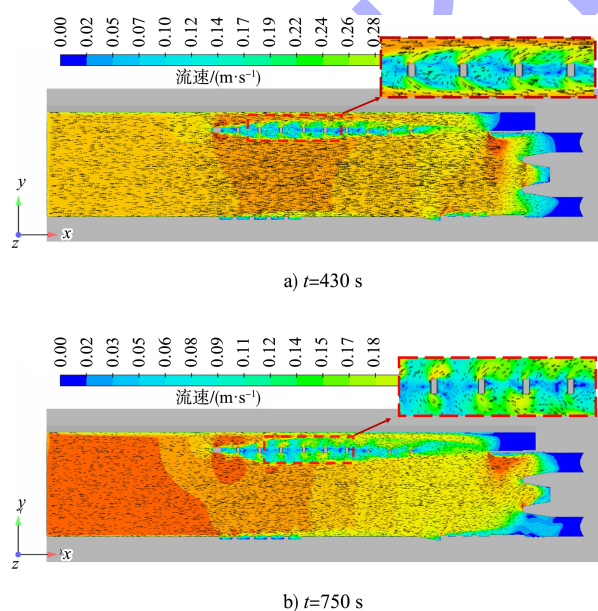


图 7 平面流速矢量云图

Fig. 7 Plane flow velocity vector nephogram

由图 7 可知，在船闸错峰灌水条件下，引航道内水流表面流速变化复杂，持续时间更长。在

3、6 min 错峰运行情况下，上引航道内流速分布均匀，无明显横流产生，仅在二线船闸靠船墩附近形成扰流及回流流态。

上闸首进水口三维流场见图 8。在进水口局部位位置附近，船闸初期灌水流量较小，水深较大，无明显不良流态，随着阀门开度逐渐增大，灌水瞬时流量增加，进水口附近纵向流速也逐渐增大。由于一、二线船闸中部进水口采用反对称布置，在双线错峰运行时，一线船闸左侧和二线船闸右侧进水口各时段的灌水流量不一致，导致一线船闸灌水流量较大、二线船闸灌水流量较小，形成顺时针表面漩涡，反之形成逆时针表面漩涡，一直持续到双线船闸阀门全开后一段时间。结合进水口在灌水流量峰值时刻的断面流速判断，在进水口上方贴壁一侧形成了小范围的立轴漩涡。由于进水口附近水深较大，而漩涡的强度和范围较小，漩涡直径在 1.0 m 左右，未贯通。

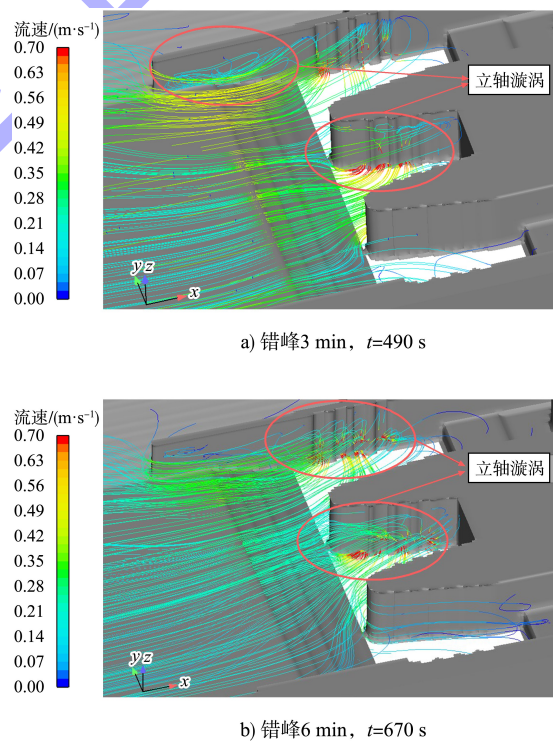


图 8 上闸首进水口三维流场

Fig. 8 Three-dimensional flow field at the upper gate head intake

在双线船闸错峰灌水过程中，上引航道在灌水阀门开启时表面流速均呈先增大、后减小的趋势，见图 9。当一线船闸先运行 3 min、二线船闸

再运行时, 上引航道整体流速在灌水阀门开启 430 s 左右达到最大, 最大流速基本在 0.50 m/s 以下; 一线船闸先运行 6 min、二线船闸再运行时, 上引航道整体流速在灌水阀门开启 750 s 左右达到最大, 最大流速基本在 0.30 m/s 以下。总的来看, 无论是 3 min 还是 6 min 错峰运行, 上引航道内整体流速分布均较均匀, 仅在二线船闸靠船墩附近

形成扰流及回流流态, 扰流及回流流速均较小, 且仅限于靠船墩局部范围内。由于一、二线船闸共用引航道, 相距较近, 相互影响较为显著, 船闸在错峰灌水期内引航道内水流流速变化复杂, 持续时间更长, 见表 2。船闸错峰灌水时, 上引航道内及进水口附近最大流速差别不大, 只是水流流速变化更为复杂, 且持续时间更长。

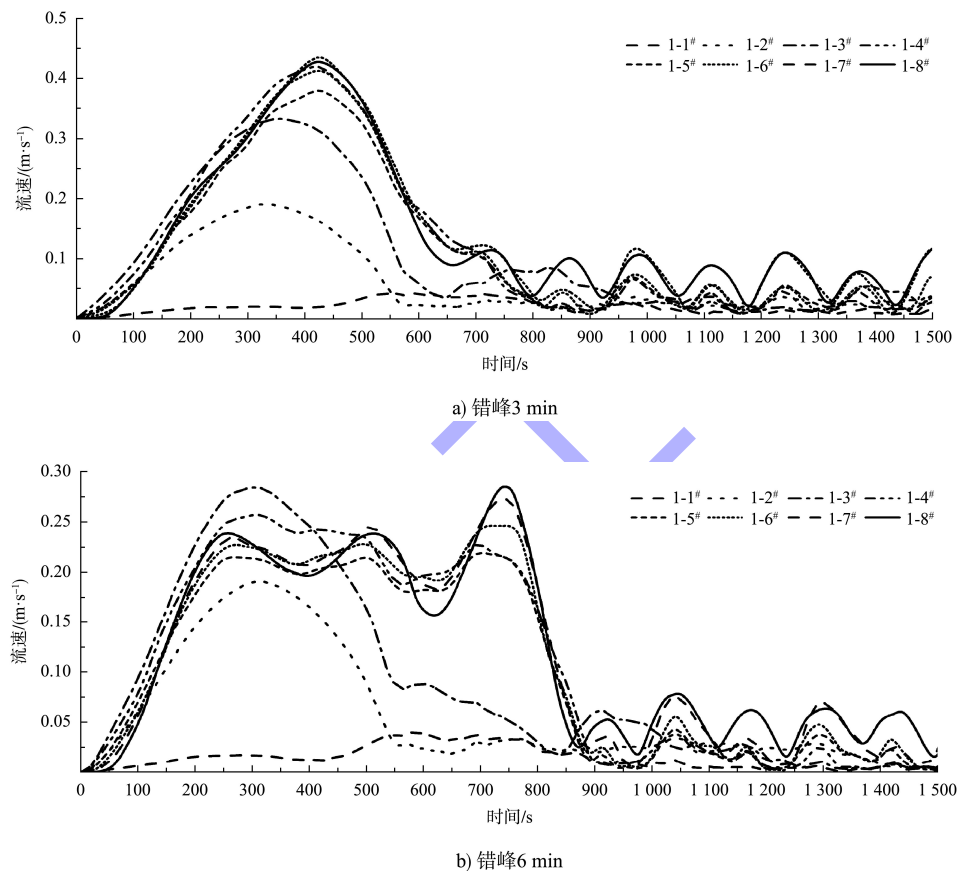


图 9 上引航道一线船闸中心线流速变化过程线

Fig. 9 Flow velocity change process lines at the center line of the first-line ship lock in the upper approach channel

表 2 上引航道灌水过程最大流速统计

Tab. 2 Maximum flow rate statistics during flooding process of upper approach channel

工况	最大流速/(m·s ⁻¹)							
	1-1# (0-0)	1-2# (0-24.5)	1-3# (0-50)	1-4# (0-100)	1-5# (0-150)	1-6# (0-200)	1-7# (0-300)	1-8# (0-400)
$t_v = 6$ min, 一线船闸先运行 3 min	0.04	0.19	0.33	0.42	0.39	0.42	0.44	0.43
$t_v = 6$ min, 一线船闸先运行 6 min	0.04	0.19	0.28	0.26	0.22	0.25	0.27	0.29

注: 0-24.5 表示距闸首 24.5 m 处为进水口中心, 距闸首 150~400 m 范围为停泊段。

3.3 上引航道水位计算成果分析

双线船闸错峰运行(一线船闸先运行,二线船闸后运行)灌水过程中上引航道内水位变化过程见图 10。

由于一、二线船闸共用引航道, 相距较近, 相互影响较为显著; 在船闸错峰灌水期内引航道内水位变化过程更为复杂, 水位恢复波高反而大于低水波高。

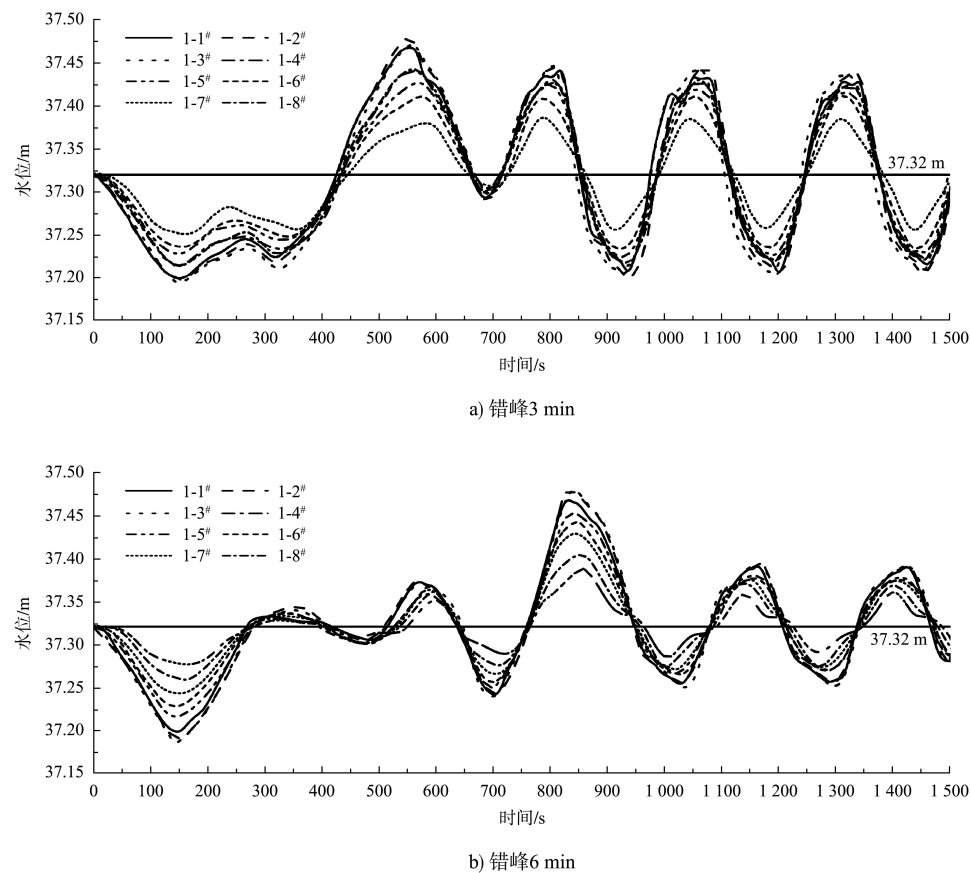


图 10 上引航道一线船闸中心线水位变化过程线

Fig. 10 Water level change process lines at the center line of the first-line ship lock in the upper approach channel

对比一线船闸先运行、二线船闸后运行的 2 种工况，见表 3，两者引起的水位波动幅度基本一致，只是在水位变化过程上有所区别。在一线船闸先运行 3 min、二线船闸再运行时，由于双线船闸错峰运行时间间隔短，在一线船闸灌水引起引航道内水位跌落后、水位还在恢复过程中时，受到二线船闸阀门开启灌水影响，引航道内水位又继续开始跌落，形成 2 个落水波波谷，其后水位才开始恢复，形成恢复波。在一线船闸先运行 6 min、二线船闸再运行时，由于双线船闸错峰运行时间

间隔为一个阀门开启时间，在一线船闸灌水时即形成一个完整的跌水波过程，其后水位在恢复过程中受到二线船闸阀门开启灌水影响，水位很快又发生跌落和震荡，在双线船闸灌水流量减小后，水位才迅速恢复，形成一个较大的恢复波。双线船闸错峰运行时，引航道内流量过程线峰值和流量变化速率减小，相应水位波动幅度减小，而在船闸灌水期内水位变化过程更为复杂，水位恢复波高在相互叠加后，略大于跌水波高。

表 3 一线船闸中心线水位统计

Tab. 3 Water level statistics at the center line of the first-line ship lock

船闸 测点	错峰 3 min					错峰 6 min				
	最高 水位/m	最低 水位/m	平均 水位/m	最大跌水 波高/m	最大恢复 波高/m	最高 水位/m	最低 水位/m	平均 水位/m	最大跌水 波高/m	最大恢复 波高/m
1-1#(0-0)	37.47	37.19	37.31	0.13	0.15	37.47	37.19	37.32	0.13	0.15
1-2#(0-24.5)	37.48	37.18	37.31	0.14	0.16	37.48	37.18	37.32	0.14	0.16
1-3#(0-50)	37.47	37.18	37.31	0.14	0.15	37.48	37.18	37.32	0.14	0.16
1-4#(0-100)	37.44	37.21	37.31	0.11	0.12	37.45	37.21	37.32	0.11	0.13

续表3

船闸 测点	错峰 3 min					错峰 6 min				
	最高 水位/m	最低 水位/m	平均 水位/m	最大跌水 波高/m	最大恢复 波高/m	最高 水位/m	最低 水位/m	平均 水位/m	最大跌水 波高/m	最大恢复 波高/m
1-5 [#] (0-150)	37.43	37.22	37.31	0.10	0.11	37.44	37.22	37.32	0.10	0.12
1-6 [#] (0-200)	37.42	37.23	37.31	0.09	0.10	37.43	37.24	37.32	0.08	0.11
1-7 [#] (0-300)	37.40	37.25	37.31	0.07	0.08	37.41	37.26	37.32	0.06	0.09
1-8 [#] (0-400)	37.38	37.26	37.31	0.06	0.06	37.39	37.27	37.32	0.05	0.07

注: 0~24.5 表示距闸首 24.5 m 处为进水口中心, 距闸首 150~400 m 范围为停泊段。

4 结论

1) 白石窑一、二线船闸在错峰灌泄时, 会在上引航道内引起水位波动、流速变化及往复流动等非恒定流现象, 对船舶航行、停泊条件产生一定影响。同时在进水口附近形成漩涡等不良流态, 对进水口进流条件产生一定影响。

2) 由于上引航道库区水深较深, 过水面积较大, 计算表明, 各灌水工况下, 上引航道内流速分布均匀, 最大流速多在 0.3~0.6 m/s。

3) 受动静水交替及边壁影响, 各灌水工况下, 在进水口附近均出现一定范围的表面漩涡, 但漩涡范围及强度均较小, 在进水口上方贴壁一侧均形成小范围的立轴漩涡, 但未贯通, 白石窑双线船闸进水口进流条件整体较好。双线船闸同时灌水运行时, 上引航道内流速及水位波动偏大, 原型灌水过程的最大流量将比模型实测大 10%~15%, 从而导致上引航道内最大纵向流速增大, 在进水口附近也可能形成范围更大、强度更强的漩涡, 并伴随更为剧烈的吸气卷气过程, 甚至出现串通漏斗漩涡, 影响进水口及闸室输水条件, 恶化阀门工作状态。因此, 为保障双线船闸灌水时上引航道及进水口水流条件, 应避免双线船闸同时灌水, 加强引航道内水流条件和进水口进流流态原型观测, 根据原型观测结果, 调整双线船闸灌水阀门开启方式、开启时间, 并加强双线船闸联合调度。

参考文献:

[1] 周权. 白石窑双线船闸共用下引航道通航水流条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

ZHOU Q. Study on navigation flow condition in common lower approach channel of Baishiyao double-line ship lock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.

[2] 杨开林. 渠网非恒定流图论原理[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1281-1289.

YANG K L. A graph theory mathematical model for unsteady flows in open channel networks[J]. Journal of hydraulic engineering, 2009, 40(11): 1281-1289.

[3] 杨开林. 基于图论的渠网非恒定流计算分析方法[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 1-4, 13.

YANG K L. Mathematical model of unsteady state flows in open channel networks based on graph theory[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2009, 7(3): 1-4, 13.

[4] 杨开林. 河渠恒定非均匀流准二维模型[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 1-8.

YANG K L. A quasi-2D model of steady non-uniform flows in open channels[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 46(1): 1-8.

[5] 伍宁. 一维圣维南方程组在非恒定流计算中的应用[J]. 人民长江, 2001, 32(11): 16-18, 56.

WU N. Application of one dimensional Saint-Venant equations in non-constant flow[J]. Yangtze River, 2001, 32(11): 16-18, 56.

- [6] MU J B, ZHANG X F. Real-time flood forecasting method with 1-D unsteady flow model[J]. Journal of hydrodynamics (Ser. B), 2007, 19(2): 150-154.
- [7] 周作茂, 陈野鹰, 杨忠超. 双线船闸引航道水力特性数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 67-72.
- ZHOU Z M, CHEN YY, YANG Z C. Numerical simulation of hydraulic characteristics of a double-line locks approach channel [J]. Hydro-science and engineering, 2013(4): 67-72.
- [8] 齐庆辉, 曲红玲, 东培华, 等. 韩庄双线船闸下游引航道水力特性模拟研究[J]. 水运工程, 2015(9): 117-122.
- QI Q H, QU H L, DONG P H, et al. Flow characteristics simulation of double-paralleling-lane locks' lower approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2015 (9): 117-122.
- [9] 黄伦超, 李珊, 游涛, 等. 双线船闸共用下游引航道水流特性及其影响[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(4): 37-44.
- HUANG L C, LI S, YOU T, et al. Flow characteristics and effects on the approach channel during the co-operation of the double-lane ship lock[J]. Journal of transport science and engineering, 2012, 28(4): 37-44.
- [10] 李加浩. 双线船闸共用引航道非恒定流特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- LI J H. Study on unsteady flow characteristics of double line ship lock common approach channel [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [11] BAI Y C, SONG X L, GAO S X. Efficient investigation on fully developed flow in a mildly curved 180° open-channel[J]. Journal of hydroinformatics, 2014, 16(6): 1250-1264.
- (本文编辑 王传瑜)
- ~~~~~
- (上接第 69 页)
- 参考文献:**
- [1] 马建汶, 蔡波妮. 液化天然气码头消防技术[J]. 水运工程, 2018(6): 69-73.
- MA J W, CAI B N. Fire fighting technology of liquefied natural gas port and jetty [J]. Port & waterway engineering, 2018(6): 69-73.
- [2] 油气化工码头设计防火规范: JTS 158—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- Code for fire protection design of oil & gas and chemical terminals: JTS 158-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [3] 消防给水及消火栓系统技术规范: GB 50974—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Code of design on fire protection water supply and hydrant systems: GB 50974-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [4] 石油化工企业设计防火标准(2018 年版): GB 50160—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- Standard for fire prevention design of petrochemical enterprises(2018 edition): GB 50160-2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [5] Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas: NFPA 59A-2013[S]. Quincy: National Fire Protection Association(NFPA), 2013.
- [6] Design and construction of LPG installations: API 2510[S]. 9th Ed. Washington: API Publishing Services, 2020.
- [7] SALOUA B, MOUNIRA R, SALAH M M. Fire and explosion risks in petrochemical plant: assessment, modeling and consequences analysis[J]. Journal of failure analysis and prevention, 2019, 19(4): 903-916.
- [8] LI N N, LIU Y B, LIU K. Primary discussion on LNG terminal fire prevention system design[J]. Procedia engineering, 2013, 52: 181-185.
- [9] International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC Code) [S]. London: International Maritime Organization, 2014.
- [10] 姜春景, 蒯晶晶, 李志鹏, 等. LNG 双燃料远洋大型集装箱船消防灭火系统设计[J]. 应用科技, 2018, 45(3): 76-80.
- LOU C J, KUAI J J, LI Z P, et al. Design of fire extinguishing system for LNG dual fuel large ocean container ship [J]. Applied science and technology, 2018, 45(3): 76-80.
- (本文编辑 赵娟)